

# Studi Eksperimen Karakteristik Lapis Batas Aliran Turbulen Melintasi Empat Silinder Sirkular Tersusun Secara Equispaced dengan Rasio Gap ( $G/D$ ) = 0,2 “Studi Kasus Untuk Pengaruh Jarak Antar Silinder di Dekat Dinding Datar ( $L/D$ ) = 2; 3; dan 4”

Kresna Adytia Putra, Wawan Aries Widodo

Lab Mekanika dan Mesin Fluida, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail : [wawanaries@me.its.ac.id](mailto:wawanaries@me.its.ac.id)

**Abstrak-** Dalam industri, silinder sirkular yang tersusun secara equispaced seringkali diaplikasikan antara lain pada jaringan pipa yang berada di dasar laut sebagai penghubung distribusi antar pulau, berbagai peralatan lainnya. Hal tersebut mendasari adanya penelitian tentang karakteristik aliran fluida turbulen melintasi empat silinder sirkular tersusun secara equispaced di dekat dinding datar. Penelitian ini dilakukan pada open circuit subsonic wind tunnel dengan empat silinder sirkular disusun secara equispaced diletakkan di atas dinding datar relatif terhadap diameter silinder ( $G/D$ ) = 0,2; dengan jarak antar silinder relative terhadap diameter ( $L/D$ ) = 2, 3, 4. Kecepatan freestream di dalam wind tunnel dijaga konstan pada 14,12 m/s dengan *Reynolds Number*  $Re = 5,3 \times 10^4$ . Dari penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa variasi jarak antar silinder memiliki fenomena berbeda-beda dengan dipengaruhi dinding datar. Jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 memiliki blockage effect terbesar dikarenakan jarak yang sempit antar silinder. Adanya interferensi wake yang terjadi pada silinder upstream dan pengaruh blockage yang terjadi pada silinder 3 mengakibatkan separasi shear layer silinder 2 cenderung terbelokkan pada sisi lower silinder 4 dan akan menyebabkan attachment pada daerah tersebut. Semakin besar jarak antar silinder ( $L/D$ ), Nilai  $C_{DP}$  pada jarak antar silinder 2 memiliki nilai yang cukup jauh berbeda dengan jarak antar silinder 3 dan 4, sedangkan jarak antar silinder 3 dan 4 memiliki kecendrungan konstan, nilai  $C_{DP}$  terbesar terjadi pada silinder 1 di  $L/D$  2, hal ini mengindikasikan bahwa pada posisi tersebut, pengaruh blockage yang ditimbulkan oleh dinding sangat besar, sehingga aliran tidak dapat mengalir secara merata melalui kedua sisi silinder.

**Kata kunci:** silinder sirkular, susunan equispaced, dekat dinding datar, koefisien tekanan ( $c_p$ ).

## I. PENDAHULUAN

Dalam proyek pembangunan yang ada pada zaman ini terdapat banyak aplikasi engineering khususnya pada jaringan pipa yang berbentuk sirkular atau mendekati sirkular yang didirikan berkelompok. Berbagai aplikasi dari silinder sirkular yang membentuk susunan tertentu seperti equispaced, staggered, atau square arrays dan lain-lain. Banyak digunakan pada penukar kalor shell-and-tube atau tube banks, jaringan pipa dasar laut dan sebagainya. Hal tersebut mendasari adanya penelitian tentang karakteristik aliran fluida turbulen melintasi empat silinder sirkular di dekat dinding datar. Sampai saat ini, penelitian aliran

melintasi silinder sirkular tetap sebagai salah satu obyek penelitian yang penting dalam mekanika fluida.

Suatu bentuk silinder dan juga susunan yang berbeda akan menimbulkan fenomena aliran yang berbeda, yang nantinya akan menimbulkan gaya angkat (*lift force*) dan juga gaya tahan (*drag force*) yang berbeda yang seharusnya dalam aplikasi teknik, timbulnya gaya drag tidak diinginkan. Besarnya gaya tersebut dipengaruhi oleh letak titik separasi pada body.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya banyak variasi susunan silinder yang telah dilakukan yaitu silinder sirkular tunggal dekat dinding, dua silinder yang tersusun *tandem* dekat dinding datar, dua silinder sirkular yang tersusun *side-by-side* pada *centerline*, dan empat silinder yang tersusun *equispaced* pada *centerline*. Penelitian [1] silinder sirkular tunggal dekat dinding datar tentang pengaruh posisi dinding datar terhadap bodi berbentuk silinder. Penelitian ini menghasilkan bahwa pada rasio gap  $G/D \geq 1,0$  tidak ada separasi di *boundary layer wall*, *upper* maupun *lower* silinder. Namun demikian, penelitian ini hanya terbatas pada aliran melintasi satu silinder diletakkan dekat dinding datar (*side wall*) saja.

Penelitian [2] dengan konfigurasi dua silinder disusun secara *side-by-side* pada *centerline wind tunnel* dengan variasi jarak transversal ( $T/D$ ) = 1,5; 2; 2,5; dan 3. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada jarak transversal yang sempit ( $T/D < 2$ ), fenomena *biased flow* terjadi pada semua bentuk silinder termasuk silinder sirkular yang diindikasikan dengan harga  $C_p$  dan  $C_D$  tidak sama antara silinder 1 dan silinder 2. Selain itu, dengan meningkatnya jarak transversal ( $T/D$ ) pada silinder sirkular, harga koefisien *drag* silinder 1 dan silinder 2 akan semakin mendekati harga koefisien *drag* silinder tunggalnya. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi *shear layer* pada daerah celah antara silinder atas maupun silinder bawah sudah tidak mempengaruhi satu sama lain.

Penelitian [3] untuk konfigurasi yang lain juga telah dilakukan, namun dengan susunan *tandem*. Dua silinder sirkular yang disusun secara *tandem* dengan jarak antar silinder konstan  $P/D = 1,5$  digunakan dalam penelitian ini dan didekatkan pada sebuah dinding datar. Variasi dilakukan pada rasio jarak gap  $G/D = 0,267; 0,333; 0,4; \text{ dan } 0,467$  antara silinder *downstream* dengan permukaan dinding datar. Hasil yang diperoleh dari eksperimen tersebut pada  $G/D \geq 0,267$ , titik stagnasi berangsur-angsur naik.

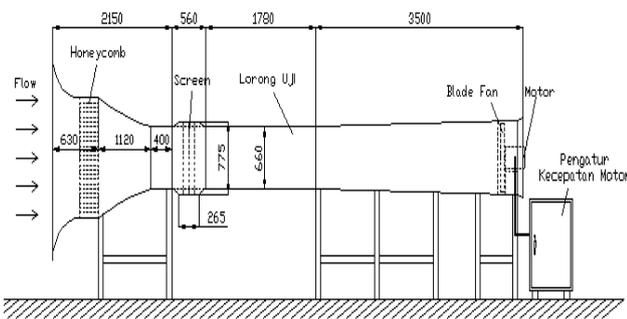
Untuk silinder *downstream*, puncak distribusi tekanan pada *lower side* bagian depan silinder terlihat jelas. Puncak tersebut menunjukkan adanya *re-attachment* dari *shear layer* yang terseparasi dari *lower side* silinder *upstream*.

Penelitian [4] konfigurasi empat silinder yang tersusun *equispaced* pada *centerline* dilakukan secara eksperimental yang bertujuan untuk mengetahui interferensi antar silinder. Hasil yang didapatkan adalah ketika  $L/D = 4$  harga  $C_p$  *upstream* silinder sama dengan  $C_p$  silinder tunggal dan  $C_p$  pada silinder *downstream* lebih besar dari  $C_p$  silinder tunggal pada seluruh  $L/D$ . Untuk susunan *equispaced* dengan  $\alpha = 0^\circ$  efek interferensi antara silinder-1 dan silinder-2 sangatlah kecil dan tidak terjadi interferensi *wake* silinder-3 dan silinder-4 sehingga harga  $C_D$  konstan dengan nilai 0,6 pada jarak  $L/D > 3$ .  $C_D$  silinder-3 dan silinder-4 mengalami penurunan ketika  $L/D = 2,2$  dan akan terus turun hingga negatif *drag* pada jarak  $L/D < 2,2$ . Dan pada  $\alpha = 0^\circ$  silinder-1 dan silinder-4 memiliki harga  $C_L$  negatif untuk semua spasi rasio begitu pula sebaliknya silinder-2 dan silinder-3 memiliki harga  $C_L$  positif untuk semua spasi rasio.

Berdasarkan penelitian terdahulu, maka dilanjutkan penelitian pengaruh dinding datar terhadap karakteristik aliran fluida turbulen yang melintasi silinder sirkular. Silinder sirkular berada di dekat dinding datar dengan rasio jarak antara dinding dengan silinder ( $G/D$ ) adalah 0,2. Pada penelitian ini, digunakan variasi jarak antar silinder  $L/D = 2, 3, 4$  dan wire dibagian depan silinder. Dari penelitian ini akan diamati bagaimana distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ), koefisien *drag* ( $C_D$ ), serta *lift* ( $C_L$ ) pada kontur masing – masing silinder sirkular dan dinding maupun profil kecepatan yang terjadi serta visualisasi alirannya.

II METODOLOGI PENELITIAN

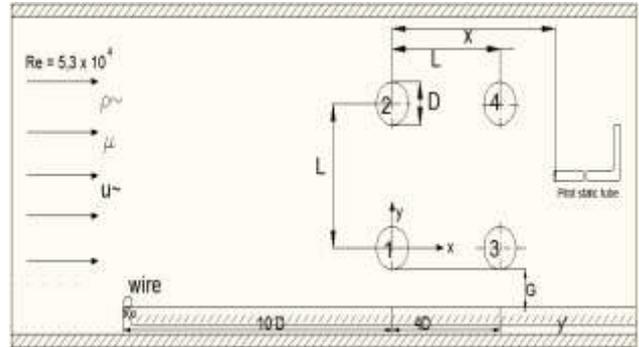
Penelitian ini menggunakan wind tunnel jenis open circuit untuk menguji benda dalam skala model, dimana udara yang dialirkan ke dalamnya langsung bebas dilepas ke udara bebas setelah melalui test section. Wind tunnel ini digolongkan sebagai subsonic wind tunnel karena kecepatan udaranya maksimal hanya 21 m/s dan Mach number-nya kurang dari 0,9. Wind tunnel ini berukuran 660 mm x 660 mm dan panjang 1780 mm.



Gambar 1 Skema dan dimensi wind tunnel

Penelitian ini menggunakan benda uji berupa empat silinder sirkular ( $D=60$  mm) yang tersusun secara *equispaced* dan sebuah dinding datar yang terbuat dari bahan acrylic dengan ukuran 1200 mm x 660 mm dan tebal 10 mm yang terpasang sejauh 100 mm dari dinding test section, serta ujungnya dipotong melintang dengan sudut

$30^\circ$  sebagai leading edge. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran tekanan di sekeliling kontur empat silinder sirkular ( $D=60$  mm) yang terbuat dari PVC, di permukaan dinding datar bagian tengah dan pengukuran velocity profile di belakang susunan silinder dengan jarak rasio  $x/D = 5.5$  dan 7.5 dengan menggunakan pitot static tube dimana skema penelitian dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Skema penelitian untuk empat silinder sirkular susunan *equispaced* dengan jarak antar silinder  $P/D = 4$  di dekat dinding datar (dipandang dari samping)

Alat ukur yang digunakan untuk mengukur tekanan adalah pressure transducer, sehingga perlu dilakukan validasi terlebih dahulu antara pressure transducer dengan manometer. Dalam proses validasi, bagian static hole pada pitot static tube dihubungkan dengan percabangan dua pipa dimana pipa pertama dihubungkan dengan inclined manometer dan pipa kedua dihubungkan pressure transducer untuk low. Sedangkan bagian stagnation hole pada pitot static tube dihubungkan dengan percabangan dua pipa dimana pipa pertama dihubungkan dengan lubang inclined manometer ujung lainnya dan pipa kedua dihubungkan dengan pressure transducer untuk high.

Gaya hambat sering diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi yaitu koefisien *drag* ( $C_D$ ), oleh karena itu persamaan untuk mengetahui gaya *drag* ini dapat didefinisikan sebagai berikut :

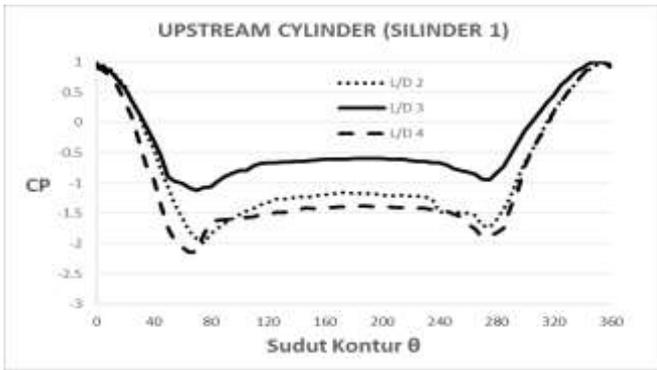
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A}$$

Gaya *lift* pada suatu profil aerodinamika dapat terbentuk jika terdapat perbedaan kecepatan fluida yang mengalir pada sisi atas dan sisi bawah dari suatu benda sehingga mengakibatkan adanya selisih distribusi tekanan. Adapun koefisien *lift* ( $C_L$ ) dapat ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A}$$

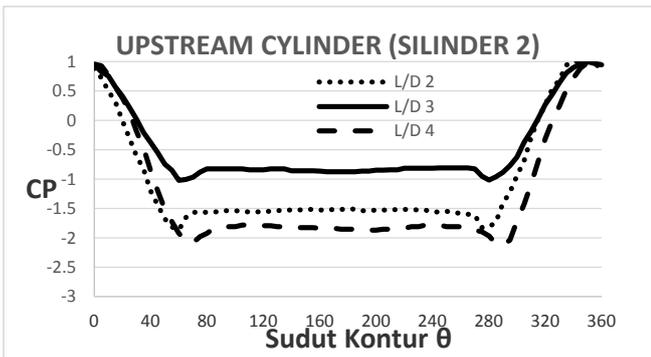
II. NALISA DAN DISKUSI

Gambar 3 dan 4 menunjukkan suatu bentuk ketidaksimetrian antara daerah upper dengan daerah lower, dengan gap ( $G/D$ ) = 0.2 memiliki jarak (celah) antara dinding datar terhadap lengkung permukaan bagian bawah silinder 1. Sehingga, adanya hambatan aliran (*blockage*). Dengan adanya *blockage* pada sisi celah, maka momentum fluida terdefleksikan seolah - olah dengan *angle of attack* tertentu ke arah upper dan memilih mengalir melalui sisi celah (sisi lower). Akibatnya, adanya akselerasi aliran yang mengalir melalui sisi upper, dan juga adanya akselerasi aliran yang memilih mengalir melalui sisi lower.



Gambar 3 Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) silinder-1

Semakin dekat jarak antar silinder ( $L/D$ ) maka titik separasi massive pada sisi upper silinder 1 yang semakin ke belakang. Terbukti pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4 separasi massive terjadi pada sudut  $80^\circ$ , kemudian pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 separasi massive terjadi pada sudut  $110^\circ$  dan pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 separasi massive terjadi pada sudut  $125^\circ$ . Hal ini menunjukkan jarak antar silinder yang semakin dekat akan mempercepat aliran yang melewati sehingga pada jarak antar silinder 2 titik separasi nya lebih ke belakang silinder karena aliran mampu lebih lama menahan *adverse pressure* dan *wall shear stress*.



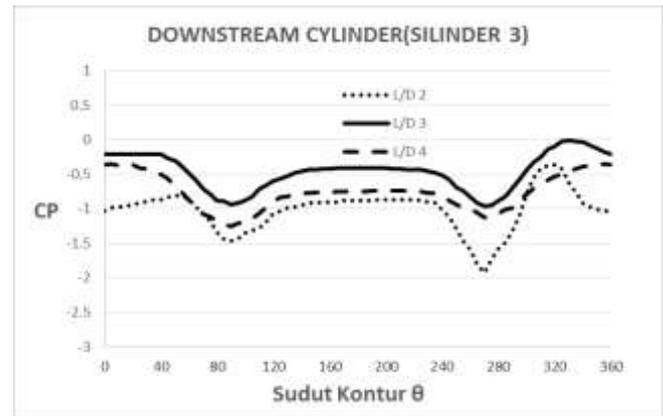
Gambar 4 Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) silinder-2

Pada silinder 2 di gambar 4, semakin besar jarak antar silinder ( $L/D$ ), maka *blockage effect* yang ditimbulkan oleh dinding akan semakin berkurang. Terlihat pada distribusi koefisien tekanan pada silinder 2 akan cenderung mendekati simetri pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4. Fenomena distribusi koefisien tekanan yang belum simetris antara daerah upper dan daerah lower pada silinder 2 ini menunjukkan bahwa masih ada interferensi antara silinder 2 dengan *blockage effect* yang mengenai silinder 1.

*Blockage effect* mempengaruhi juga titik separasi bagian upper silinder. Jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 mengalami separasi paling cepat, kemudian dilanjutkan jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3, lalu jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4. Hal ini disebabkan oleh pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 mengalami titik stagnasi dibagian bawah silinder yaitu di sudut  $345^\circ$ , sehingga aliran yang melewati silinder mengalami separasi di bagian depan silinder yaitu di sudut  $65^\circ$ . Dan ketika jarak antara silinder semakin jauh maka pada silinder 2 titik separasinya lebih ke atas bagian silinder, terlihat pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 dan 4 masing-masing aliran mengalami separasi di bagian upper silinder di sudut  $75^\circ$  dan  $85^\circ$ .

Analisa distribusi koefisien tekanan ( $CP$ ) pada silinder sirkular-3 dengan variasi jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2, 3 dan 4 pada Gambar 5. Pada silinder 4 diduga adanya re-attachment shear layer dari separasi silinder 1 pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 di sudut kontur  $\theta = 320^\circ$ , pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 di sudut kontur  $\theta = 330^\circ$  dan pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4 di sudut kontur  $\theta = 355^\circ$ . Setelah re-attach di sisi lower silinder 3, shear layer terpisah menjadi dua. Satu shear layer menelusuri sisi lower kontur silinder dan terseparasi massive pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 di sudut kontur  $\theta = 240^\circ$ , kemudian pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 di sudut kontur  $\theta = 240^\circ$  dan pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4 di sudut kontur  $\theta = 240^\circ$ , satu lagi shear layer menelusuri sisi upper kontur silinder dan terseparasi massive pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 di sudut kontur  $\theta = 140^\circ$ , kemudian pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 di sudut kontur  $\theta = 135^\circ$  dan pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4 di sudut kontur  $\theta = 120^\circ$ .

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada silinder-3 menunjukkan bahwa shear layer yang terseparasi massive dari silinder-1, membentuk wake yang besar sehingga dapat melingkupi silinder-3. Dengan kejadian tersebut, maka nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur dari silinder-3 bernilai negatif. Pada gambar dapat dilihat bahwa terdapat titik puncak (*peak*) yang terjadi pada lower-side silinder-4. Adanya peak tersebut merupakan suatu re-attachment pada lower-side silinder.



Gambar 5 Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) silinder-3

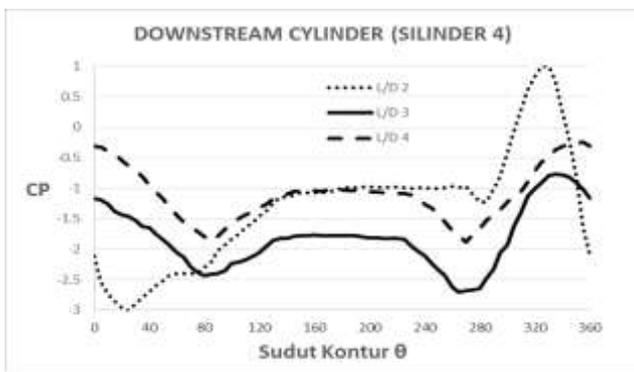
*Blockage effect* yang terjadi di sisi celah dinding dengan silinder mengakibatkan shear layer dari separasi silinder-1 cenderung terbelokkan pada kontur permukaan silinder-3. Setelah attach di kontur permukaan silinder-3, shear layer terpisah menjadi dua yaitu menuju upper-side dan menuju lower-side. Shear layer yang menuju upper-side akan bergabung dengan separasi shear layer dari silinder-1 bagian upper. Aliran yang melewati sisi -lower akan mengalami *flow accelerated* yang diindikasikan dengan kenaikan kecepatan akibat *streamtube* yang semakin menyempit.

Pengecilan *streamtube* tersebut akan mengakibatkan aliran fluida mengalami penurunan tekanan hingga minimum ( $C_{Pmin}$ ) pada jarak antar silinder 2 di sudut kontur  $\theta = 90^\circ$  untuk upper-side dan  $\theta = 270^\circ$  untuk lower-side. pada jarak antar silinder 3 di sudut kontur  $\theta = 90^\circ$  untuk upper-side dan  $\theta = 270^\circ$  untuk lower-side pada jarak antar silinder 4 di sudut kontur  $\theta = 90^\circ$  untuk upper-side dan  $\theta = 270^\circ$  untuk lower-side. Setelah mencapai tekanan minimum, *streamtube* membesar sehingga menyebabkan terjadinya

kenaikan tekanan (*adverse pressure*) pada aliran fluida pada daerah tersebut. Hal ini akan mengakibatkan aliran fluida di dalam boundary layer silinder mengalami perlambatan. Selain itu, adanya tegangan geser pada permukaan kontur silinder juga mengakibatkan momentum fluida yang mengalir di atasnya menjadi berkurang.

Pada waktu momentum fluida pada lower-side sudah tidak dapat melawan adanya *adverse pressure* dan *wall shear stress*, maka aliran tersebut akan berpisah dari konturnya yang disebut massive separasi aliran. Sedangkan aliran yang melewati sisi upper juga akan mengalami *flow accelerated* yang diindikasikan dengan penurunan tekanan hingga mencapai minimum. Setelah mencapai tekanan minimum, *streamtube* akan membesar yang mengakibatkan terjadinya kenaikan tekanan (*adverse pressure*) aliran pada daerah upper bagian belakang silinder.

Gambar 6 menunjukkan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada silinder-4 (*downstream lower*). Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada silinder-4 menunjukkan bahwa shear layer yang terseparasi massive dari silinder-2 membentuk wake yang besar sehingga melingkupi silinder-4. Dengan kejadian tersebut, maka nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur dari silinder-4 bernilai negatif.



Gambar 6 Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) silinder-4

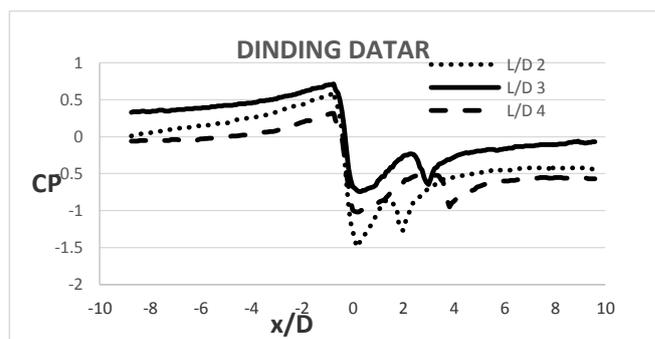
Re-attachment pada bagian lower kontur silinder-4 ini diduga akibat masih adanya pengaruh jarak antar silinder dan dinding di dekat susunan empat silinder. Blockage effect yang terjadi di sisi celah dinding dengan silinder mengakibatkan shear layer dari separasi silinder-2 cenderung terbelokkan pada kontur permukaan silinder-4. Setelah attach di kontur permukaan silinder-4, shear layer terpisah menjadi dua yaitu menuju upper-side dan menuju lower-side. Kemudian aliran mengalami penurunan tekanan seiring bertambahnya kecepatan aliran yang melintasi kontur silinder.

Setelah mencapai tekanan minimum, celah antara permukaan silinder dan dinding datar akan membesar sehingga menyebabkan terjadinya kenaikan tekanan (*adverse pressure*) aliran pada daerah tersebut. Hal ini akan mengakibatkan aliran fluida di dalam boundary layer silinder mengalami perlambatan. Selain itu, adanya tegangan geser pada permukaan kontur silinder juga mengakibatkan momentum fluida yang mengalir di atasnya menjadi berkurang. Pada waktu momentum fluida pada lower-side sudah tidak dapat melawan adanya *adverse pressure* dan *wall shear stress* maka aliran tersebut akan berpisah dari konturnya yang disebut massive separasi aliran. Sedangkan aliran yang melewati sisi upper juga akan

mengalami *flow accelerated* yang diindikasikan dengan penurunan tekanan hingga mencapai minimum.

Pada gambar 6 dapat dilihat bahwa terdapat titik puncak (*peak*) yang terjadi pada lower-side silinder 4. Adanya peak tersebut merupakan suatu re-attachment pada lower-side silinder. Re-attachment tersebut menandakan bahwa shear layer dari separasi silinder-2 re-attach pada sisi lower kontur permukaan silinder-3. Titik re-attachment pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 berada pada sudut  $\theta = 325^\circ$  di lower-side silinder-4.

Untuk gambar 7, pada distribusi tekanan sepanjang dinding datar untuk variasi jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 tampak bahwa adanya deselerasi maksimum ketika momentum fluida akan melewati celah sempit (gap) pada silinder-1 dan juga silinder-3. Hal tersebut ditandai adanya puncak (*peak*) mengindikasikan bahwa telah terjadi deselerasi maksimum sesaat momentum fluida memasuki celah silinder sirkular 1 dan silinder sirkular 3. Fenomena ini menunjukkan bahwa adanya *blockage effect* yang cukup besar di sisi lower silinder 1, sehingga menyebabkan sebagian besar aliran menuju ke sisi upper silinder. Pada  $x/D = 1.47$ , aliran mengalami akselerasi dan nilai koefisien tekanan mulai menurun tajam. Hal ini disebabkan oleh adanya celah sempit antara sisi lower silinder dengan dinding.



Gambar 7 Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada dinding (Lower Wall)

Setelah mengalami deselerasi, aliran fluida mengalami akselerasi kembali yang ditandai dengan menurunnya nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) sampai dengan  $C_{pmin}$  dinding datar. Pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 lebih cepat mengalami akselerasi yang kedua dikarenakan jarak antara silinder lebih dekat, dilanjutkan jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 dan terakhir jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4. Pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 nilai  $C_{pmin}$  akselerasi pertama dengan nilai  $C_{pmin}$  akselerasi kedua berbeda cukup jauh, hal ini dikarenakan pada silinder downstream masih berada di dalam daerah wake silinder silinder upstream. Pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 dan 4 nilai  $C_{pmin}$  akselerasi pertama dengan  $C_{pmin}$  akselerasi kedua mulai hampir sama, artinya silinder downstream hampir tidak terpengaruh lagi oleh silinder upstream.

Dan kemudian terjadi proses recovery yang selanjutnya berangsur menjadi konstan. Nilai koefisien tekanan tertinggi ( $C_{pmax}$ ) pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 berada di  $x/D = -1$ , lalu jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 di  $x/D = -1$  dan jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4 di  $x/D = -0.67$ . Nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) meningkat lagi pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 di  $x/D = 1.47$ , pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 3 di  $x/D = 2.083$ , dan jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4 di  $x/D = 2.91$ . Proses recovery menjadi konstan pada jarak

antar silinder (L/D) 2 di  $x/D = 3$ , lalu jarak antar silinder (L/D) 3 di  $x/D = 4$ , dan jarak antar silinder (L/D) 4 di  $x/D = 3.83$ .

Pada jarak antar silinder (L/D) 2, 3 dan 4 harga akselerasi maksimum tidak terjadi pada celah tersempit antara silinder sirkular dengan dinding datar atau pada posisi ( $x/D = 0$ ), namun sedikit bergeser ke kanan pada posisi (rata-rata  $x/D = 0.1$ ) atau sering disebut dengan istilah *vena contracta*.

Untuk silinder yang didekatkan dengan dinding, maka terjadi suatu proses interaksi antara boundary layer dinding dengan silinder yang saling mempengaruhi satu dengan lainnya. Akibatnya, distribusi tekanan pada silinder tidak simetri, baik pada sisi upper dan sisi lower. Sehingga akan timbul gaya lift, disamping juga gaya drag. Seperti diketahui bersama bahwa koefisien drag (gaya hambat) terdiri dari koefisien pressure drag dan skin friction drag. Namun, pada silinder sirkular koefisien pressure drag ( $C_{DP}$ ) jauh lebih dominan dibandingkan dengan skin friction drag. Sehingga koefisien pressure drag ( $C_{DP}$ ) dapat dianggap sebagai koefisien drag.

Tabel 1 Koefisien Pressure Drag ( $C_{DP}$ ) dan Koefisien Pressure Lift ( $C_{LP}$ ) Tiap Silinder pada Susunan Equispaced Empat Silinder Sirkular dengan  $G/D = 0.2$  pada Variasi Jarak Antar Silinder (L/D) 2, 3 dan 4

L/D	Silinder 1		Silinder 2		Silinder 3		Silinder 4	
	Cdp	Clp	Cdp	Clp	Cdp	Clp	Cdp	Clp
2	1,41	0,26	1.29	0.30	0,08	-0,01	-0.33	1.32
3	1,01	0,27	0.98	0,14	0,22	0,04	0.22	0.03
4	1,16	0,34	0.88	0,08	0,22	0,07	0.38	0.08

Dari Tabel 1 dapat diketahui bahwa pada silinder-1 memiliki nilai koefisien pressure drag ( $C_{DP}$ ) yang cenderung turun seiring bertambahnya jarak antar silinder. Nilai  $C_{DP}$  pada jarak antar silinder (L/D) besar dikarenakan pengaruh dari blockage effect yang terjadi dicelah silinder 1 dan dinding datar. Untuk koefisien pressure lift ( $C_{LP}$ ) pada silinder-1 mempunyai nilai yang cenderung konstan bernilai positif dari jarak antar silinder yang paling kecil hingga paling lebar. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran lebih memilih untuk mengalir ke daerah upper silinder di jarak antar silinder yang dekat maupun yang jauh, disebabkan oleh adanya blockage effect.

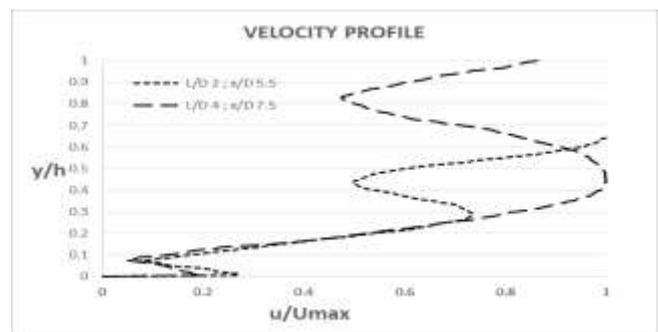
Jika dilihat pada silinder-2, nilai pressure drag koefisien pressure drag ( $C_{DP}$ ) dan koefisien pressure lift ( $C_{LP}$ ) cenderung menurun seiring bertambahnya jarak antar silinder. Untuk nilai koefisien pressure lift ( $C_{LP}$ ) dari jarak antar silinder terkecil sampai jarak antar silinder terbesar mengalami penurunan. Artinya aliran semakin merata mengalir ke daerah upper dan lower silinder. Kemudian untuk nilai koefisien pressure drag di jarak antar silinder 3 mempunyai nilai  $C_{DP}$  yang besar karena masih terpengaruh oleh blockage effect yang terjadi di dinding datar. Semakin besar jarak antar silinder, efek dari blockage mulai berkurang.

Kemudian pada silinder-3, koefisien pressure drag ( $C_{DP}$ ) dan koefisien pressure lift ( $C_{LP}$ ) menunjukkan nilai cenderung naik dengan semakin bertambahnya jarak antar

silinder, perbedaan nilai yang sangat jauh antara jarak antar silinder (L/D) 2 dan 3, namun hanya berbeda sedikit nilai antara jarak antar silinder (L/D) 3 dan 4. Untuk nilai koefisien pressure drag ( $C_{DP}$ ) mengalami peningkatan karena jarak antara silinder yang semakin besar. Pada jarak antar silinder (L/D) 2 mempunyai nilai koefisien pressure lift ( $C_{LP}$ ) negatif, hal ini dapat diartikan bahwa aliran yang melewati upper-side silinder-3 lebih besar dibandingkan dengan aliran yang melewati lower-side pada silinder-4 sehingga silinder-3 seolah-olah terkena gaya ke bawah akibat dari aliran yang melewati upper-side. Pada jarak antar silinder 3 dan 4 nilai koefisien pressure lift ( $C_{LP}$ ) mendekati angka nol yang berarti pada silinder 3 sudah menunjukkan koefisien distribusi tekanan yang simetri antara daerah upper dengan daerah lower.

Untuk silinder-4 nilai koefisien pressure drag ( $C_{DP}$ ) meningkat seiring bertambahnya jarak antar silinder dan nilai koefisien pressure lift ( $C_{LP}$ ) menurun seiring bertambahnya jarak antar silinder. Di jarak antar silinder (L/D) 2 mempunyai nilai  $C_{DP}$  yang negatif karena masih terpengaruh oleh wake dari silinder 2. Kemudian nilai  $C_{LP}$  di jarak antar silinder mempunyai nilai yang besar karena adanya gaya dorong ke atas oleh aliran yang melewati celah antara silinder upper dan silinder lower.

Pengukuran profil kecepatan di belakang silinder pada test section diukur pada jarak  $x/D = 5.5$  dan  $x/D = 7.5$  dimana x adalah jarak titik pengukuran dengan titik pusat silinder upstream (midspan) sedangkan D adalah diameter silinder. Profil kecepatan ini ditampilkan dalam grafik  $u/U_{max}$  fungsi posisi  $y/h$ , y merupakan posisi titik pengukuran yaitu jarak pengukuran profil kecepatan dari dinding datar untuk tiap kenaikan 5 mm. Sedangkan h adalah panjang lintasan titik-titik pengukuran yaitu 560 mm disepanjang cross section area lorong uji. Hasil pengukuran profil kecepatan di belakang silinder yang diletakkan pada test section di  $x/D = 5.5$  dan  $x/D = 7.5$  diperlihatkan pada gambar 8.



Gambar 8 Profil kecepatan di belakang empat silinder sirkular yang tersusun secara equispaced antara L/D = 2 dengan  $x/D = 5.5$  dan L/D = 4 dengan  $x/D = 7.5$

Pada gambar 8 ditunjukkan profil kecepatan dibelakang empat silinder sirkular yang tersusun secara equispaced. Profil kecepatan tersebut menunjukkan adanya pengurangan momentum yang terjadi pada aliran yang berada tepat dibelakang silinder. Dari gambar 4.6 juga terlihat bahwa daerah wake yang terbentuk dari keempat silinder dengan jarak antar silinder 4 mulai menuju relatif simetri. Artinya pada keempat silinder tersebut hanya timbul gaya drag saja. Ataupun jika terdapat gaya lift, maka gaya lift untuk masing-masing silinder bernilai sangat kecil (mendekati nol). Sedangkan besarnya gaya drag dapat direpresentasikan

dengan besarnya defisit momentum atau pengurangan pada kecepatan aliran di belakang silinder.

Perbedaan grafik di atas terlihat pada bentuk grafiknya, dimana grafik profil kecepatan jarak antar silinder 4 dengan  $x/D = 7.5$  lebih simetri dibandingkan jarak antar silinder 2 dengan  $x/D = 5.5$ . Artinya, variasi jarak antar silinder mempunyai pengaruh terhadap *velocity profile* pada aliran yang melewati silinder. Pada grafik jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 menunjukkan defisit momentum yang paling besar dikarenakan jarak antara silinder yang dekat sehingga menghambat aliran yang masuk. Hal ini diindikasikan oleh grafik kecepatan aliran yang melewati sisi celah antara silinder menjauhi kecepatan aliran freestream seiring semakin dekat jarak antar silinder. Kondisi ini menandakan bahwa semakin dekat jarak antar silinder, hambatan semakin besar dan aliran yang melewati celah lebih susah.

Untuk jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4 mempunyai defisit momentum yang kecil, sehingga dapat dikatakan mempunyai gaya hambat yang kecil juga. Kejadian tersebut dikarenakan semakin besarnya jarak antara silinder upper-side dan lower-side mengakibatkan momentum aliran fluida yang pada awalnya cenderung melewati lower-side pada silinder 3, berangsur sebagian berpindah melewati upper-side silinder pada silinder 3 sehingga aliran yang melewati upper-side dan lower-side silinder merata dan defisit momentum yang terjadi pada wake silinder downstream semakin melemah.

### III. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari analisa dan diskusi tentang hasil eksperimental aliran fluida melintasi empat silinder sirkular yang tersusun secara *equispaced* dengan pengaruh dinding datar diperoleh beberapa kesimpulan antara lain:

1. Terjadi *blockage* pada sisi celah silinder 1 untuk rasio gap 0,2. Adanya *blockage* pada sisi celah ini menyebabkan sebagian besar aliran menghindari sisi celah dan memilih mengalir melalui sisi *upper* silinder. Akibatnya, distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) antara daerah *upper* dengan daerah *lower* belum mencapai kesimetrian.
2. Pada jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2, 3 dan 4, distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur permukaan silinder 3 dan silinder 4 untuk  $G/D$  0,2, hampir semuanya berharga negatif. Hal ini diduga akibat adanya separasi *massive* dari silinder 1 dan silinder 2 yang menimbulkan *wake* yang melingkupi kontur silinder 3 dan silinder 4.
3. Nilai  $C_{DP}$  pada jarak antar silinder 2 memiliki nilai yang cukup jauh berbeda dengan jarak antar silinder 3 dan 4, sedangkan jarak antar silinder 3 dan 4 memiliki kecenderungan konstan, nilai  $C_{DP}$  terbesar terjadi pada silinder 1 di  $L/D$  2, hal ini mengindikasikan bahwa pada posisi tersebut, pengaruh *blockage* yang ditimbulkan oleh dinding sangat besar, sehingga aliran tidak dapat mengalir secara merata melalui kedua sisi silinder.
4. Nilai  $C_{LP}$  pada masing-masing silinder memiliki kecenderungan mendekati nilai nol seiring bertambahnya jarak antar silinder, hal ini menunjukkan bahwa semakin besar jarak antar silinder ( $L/D$ ) distribusi aliran semakin merata mengalir pada sisi *upper* maupun sisi *lower* silinder.
5. Terlihat variasi jarak antar silinder ( $L/D$ ) mempengaruhi profile kecepatan aliran fluida yang melewati silinder, bahwa jarak antar silinder ( $L/D$ ) 4 dengan  $x/D = 5.5$

mempunyai defisit momentum yang lebih kecil dibandingkan jarak antar silinder ( $L/D$ ) 2 dengan  $x/D = 7.5$ .

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterimakasih kepada ALLAH dan Rasul-Nya, dosen pembimbing Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT, orang tua dan seluruh pihak yang telah membantu dan seluruh staf jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya yang telah memberikan banyak pelajaran berharga kepada penulis.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Price, S.J., Sumner, D., Smith, J.G., Leong, K., & Paidoussis, M.P., *Flow Visualization Around a Circular Cylinder Near to Plane Wall*, *Journal of Fluid and Structures.*, Vol.16, 175-191, 2002.
- [2] Widodo, Wawan Aries; Yuwono, Triyogi, *Karakteristik Aliran Dua Silinder Sirkular Maupun Silinder Tegak Teriris (Tipe-D) Dengan Sudut Iris ( $\theta_s$ ) =  $36^\circ$ ,  $53^\circ$ , dan  $66^\circ$  Dengan Susunan Side-By-Side*, Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, 2003.
- [3] Yuwono, Triyogi; Fahreza, Fahmi; Widodo, Wawan Aries, *Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular Dengan Susunan Tandem Dekat Dinding Datar*, Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, 2010.
- [4] Lam, K., Fang, X., The Effect of Interference of Four Equispaced Cylinders in Cross Flow on Pressure and Force Coefficient, *Journal of Fluid and Structures.*, Vol.9, 195-214, 1994.